

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы
«Исследование сглаживающих фильтров»
по дисциплине «Энергетическая электроника»
для студентов электротехнических специальностей,
в том числе для иностранных студентов

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,

протокол № 1 от 19.02. 2020.

Харьков
НТУ «ХПИ»
2020

Методические указания к выполнению лабораторной работы «**Исследование сглаживающих фильтров**» по дисциплине «Энергетическая электроника» для студентов электротехнических специальностей, в том числе для иностранных студентов / Сост.: Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, О. И. Холод. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2020.

Составители: Г. Г. Жемеров,
 Д. С. Крылов,
 О. И. Холод

Рецензент проф. Замаруев В. В.

Кафедра промышленной и биомедицинской электроники

ВСТУПЛЕНИЕ

Настоящими методическими указаниями рекомендуется пользоваться при выполнении лабораторной работы по дисциплинам «Энергетическая электроника» при изучении работы сглаживающих фильтров в различных схемах неуправляемых выпрямителей на физическом макете преобразовательного оборудования, представляющем собой сварную конструкцию с вмонтированными в неё источником питания, измерительной аппаратурой, а также контактными переключателями, позволяющими собрать требуемую конфигурацию схемы.

Целью лабораторной работы является исследование сглаживающих фильтров и их влияния на работу неуправляемых выпрямителей (НВ) условно средней или большой мощности. В процессе лабораторной работы исследуются: формы выходного напряжения и сетевых токов, внешние характеристики, пульсации выпрямленного напряжения до фильтра и после него, коэффициент фильтрации.

Лабораторный стенд позволяет изменять параметры соединительных кабелей и сопротивления нагрузки, собирать различные схемы неуправляемых выпрямителей и пассивных фильтров.

Составители методических указаний стремились, чтобы навыки, получаемые студентами при работе на стенде, были приближены к таковым при работе на физической модели НВ с различными типами фильтров. Изучая работу неуправляемого выпрямителя с сглаживающими фильтрами на физическом макете, студент получает возможность лично ознакомиться с работой конкретного образца преобразовательной техники, получить практический опыт его эксплуатации, что, в конечном итоге, повысит конкурентоспособность будущего специалиста на рынке труда.

Перед выполнением лабораторной работы все студенты обязаны пройти инструктаж по технике безопасности при работе с электроаппаратурой.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Исходные данные для выполнения лабораторной работы задаёт руководитель работы в виде конфигурации исследуемой схемы преобразователя, величины сопротивления соединительных кабелей, типов исследуемых фильтров, диапазона изменения сопротивления нагрузки, режимов осциллографирования и количества снимаемых при исследовании осциллограмм, количества и типа характеристик, необходимых для дальнейшего построения.

Варианты таблиц исходных данных для исследования работы неуправляемого выпрямителя с пассивными фильтрами приведены в Приложении А и Приложении Б соответственно.

2. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

По указанию руководителя лабораторной работы необходимо выполнить все или часть следующих заданий:

1. Исследование формы выпрямленного напряжения u_d и тока i_d в заданной схеме НВ без фильтра и с различными типами сглаживающих фильтров.
2. Исследование формы напряжения на нагрузке u_n .
3. Исследование формы сетевого тока i_2 и напряжения сети u_2 при подключении НВ без фильтра и НВ с различными типами сглаживающих фильтров.
4. Исследование внешних характеристик НВ без фильтра и с различными типами сглаживающих фильтров.
5. Определение амплитуд переменных составляющих выпрямленного напряжения на входе фильтра $U_{в\max}$ и после него $U_{в\max}$.
6. Определение коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения на входе фильтра $K'_п$ и после него $K_п$.
7. Исследование зависимости коэффициента пульсации от выпрямленного тока при работе НВ без фильтра и с различными типами сглаживающих фильтров.
8. Определение коэффициента фильтрации $K_ф$ различных типов сглаживающих фильтров.
9. Исследование зависимости коэффициента фильтрации от выпрямленного тока при работе НВ без фильтра и с различными типами сглаживающих фильтров.
10. Определение коэффициента полезного действия $\eta_ф$ фильтров.
11. Определение величины емкости C_k и индуктивности L_k для основной частоты переменной составляющей выпрямленного напряжения при исследовании фильтра с резонансным контуром.
12. Исследование влияния анодных резистор $R_{15}–R_{20}$ на форму напряжения на нагрузке и вентилях при емкостной и индуктивной реакции фильтра.

3. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Отчёт по лабораторной работе составляется каждым студентом индивидуально с соблюдением действующих стандартов оформления технической документации. Отчёт оформляется на листах бумаги формата А4, должен иметь титульный лист и быть скреплён в левом верхнем углу.

Отчёт должен содержать цель лабораторной работы, принципиальную электрическую схему исследованного преобразователя сглаживающих фильтров, нарисованную с использованием электротехнической линейки или с помощью ЭВМ, таблицы экспериментальных и расчётных данных, построен-

ные по ним зависимости, комплект осциллограмм и выводы о проделанной работе.

Осциллограммы зарисовываются карандашом на листе масштабной координатной бумаги (миллиметровки) с учётом масштаба, выбранного при осциллографировании, и располагаются одна под другой с чёткой временной синхронизацией. Все осциллограммы должны быть подписаны, рядом с каждой должен быть указан масштаб по осям X и Y .

Графические зависимости, построенные карандашом на бумаге или с помощью ЭВМ, должны быть подписаны, содержать проставленные точки, по которым они были построены. С учётом погрешности измерений, графические зависимости должны быть аппроксимированы в соответствии с теорией протекания исследуемых процессов в схеме.

В выводах о проделанной работе должны быть отмечены основные теоретические положения, которые были исследованы в ходе практического эксперимента, отражены совпадения или отличия работы схемы от теории её работы и указаны причины этого.

4. СТРУКТУРА СИЛОВОЙ ЧАСТИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Лабораторный стенд представляет собой сварную конструкцию в виде пульта (рис.4.1), на котором расположены две панели: вертикальная – приборная и горизонтальная – схемная.



Рисунок 4.1 – Общий вид лабораторного стенда

На приборной панели расположены приборы измерительного комплекса и щит питания. На схемной панели изображена электрическая принципиальная схема установки, состоящая из сетевого потенциал-регулятора, преобразовательного трансформатора (ПТ), вентильного комплекта (ВК), блока фильтров (БФ) и регулируемой нагрузки (РН). К схемной панели подсоединено все оборудование стенда, которое с помощью гнезд и вилок собирается в необходимую для исследования схему.



Рисунок 4.2 – Щит питания стенда

Трехфазное питающее напряжение от щита питания стенда (рис.4.2) через два автоматических выключателя подается с помощью гибких перемычек на вход потенциал-регулятора, предназначенного для регулирования величины питающего

напряжения силовой схемы установки (рис.4.3 и 4.4).

Сетевая и вентильная обмотки преобразовательного трансформатора собрана по схеме "звезда" с нулевым проводом. Сопротивления $R15 - R20$ имитируют активные сопротивления обмоток трансформатора. Они могут быть выведены из работы схемы полностью или частично закорачиванием перемычками соответствующих пар гнезд (1–9) по заданию преподавателем.

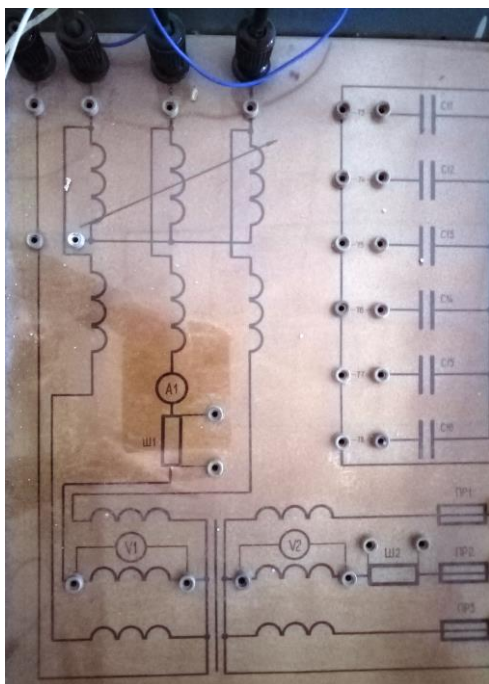


Рисунок 4.3 – Силовая схема потенциал-регулятора и преобразовательного трансформатора

Вентильная часть преобразователя состоит из шести диодов, собранных в две вентильных группы – катодную и анодную. По заданию преподавателя на их основе могут быть собраны различные схемы неуправляемых выпрямителей, приведенные таблице 4.1 и в крайней правой части схемной панели стенда. Так же в таблице 4.1 указаны номера пар гнезд, которые необходимо закоротить, что бы получить заданный тип неуправляемого выпрямителя без

фильтра.

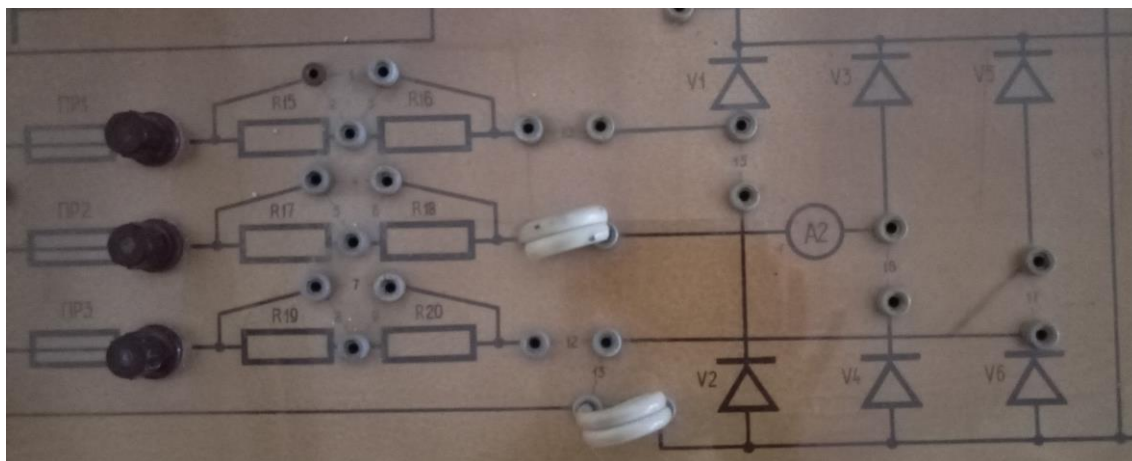


Рисунок 4.4 – Силовая схема преобразователя

Блок фильтров (рис. 4.5) состоит из резисторов $R1-R6$, дросселей $L1-L6$ и конденсаторов $C1-C8$, с помощью которых собирают схемы различных сглаживающих фильтров, представленные в таблице 4.2 и в крайней правой части схемной панели стенда. В таблице 4.3 приведены номинальные величины элементов блока фильтров, а в таблице 4.2 указано номера пар гнезд, которые необходимо закоротить, что бы собрать заданную схему фильтра.

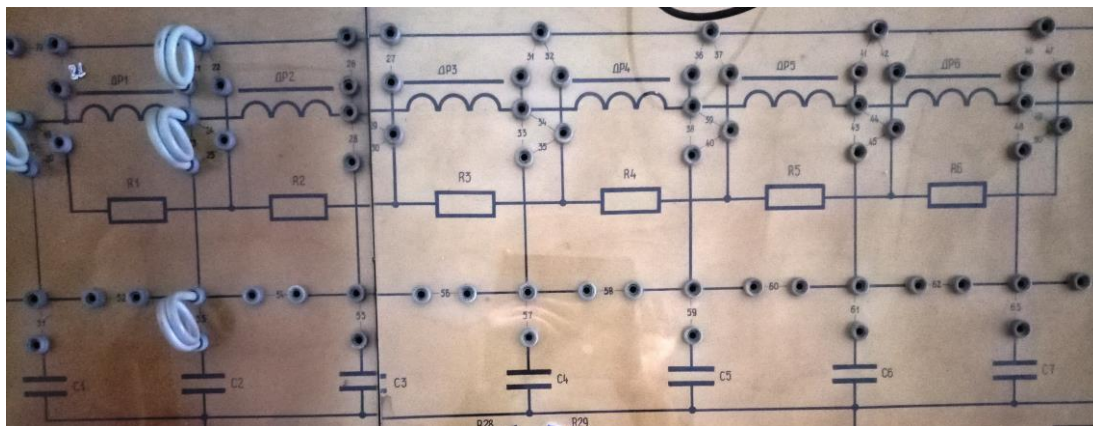
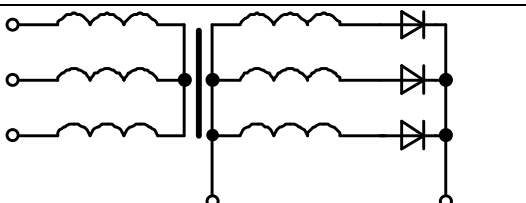
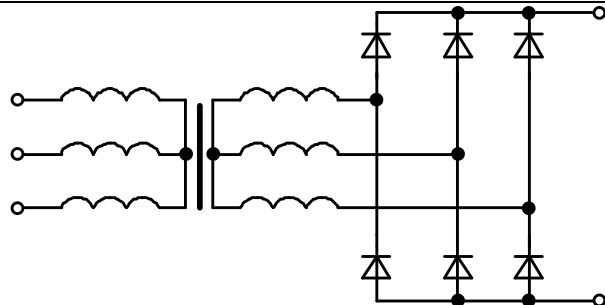
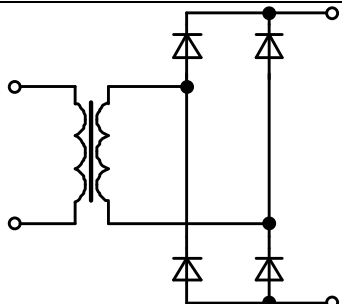
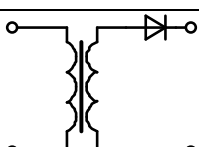


Рисунок 4.5 – Силовая схема блока фильтров

Таблица 4.1 – Схемы неуправляемых выпрямителей

Тип схемы неуправляемого выпрямителя	Номера пар гнезд
	Трёхфазная нулевая 1, 4, 7, 10, 11, 12, 14, 18, 81
	Трёхфазная мостовая 1, 4, 7, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 81
	Однофазная мостовая 1, 4, 10, 11, 15, 16, 18, 81
	Однофазная однотактная 4, 11, 18, 81

Регулируемая нагрузка состоит из резисторов $R_{21} - 30$ и имеет активный характер. Переключатель позволяет изменять нагрузку ступенчато (рис. 4.6).

Таблица 4.2 – Схемы фильтров

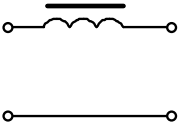
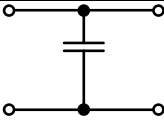
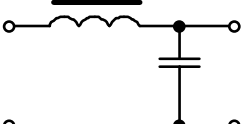
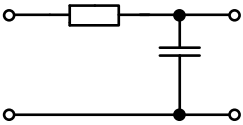
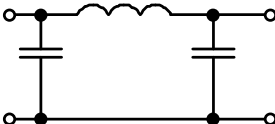
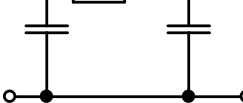
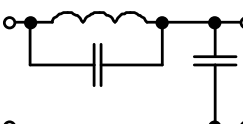
Тип схемы фильтра	Номер пар гнезд
	Индуктивный 18, 21
	Емкостной 18, 51, 81
	Г-образный LC 18, 21, 23, 53
	Г-образный RC 20, 22, 25, 53
	П-образный LC 18, 51, 21, 23, 53
	П-образный RC 20, 21, 23, 51, 53
	Г-образный с резонансным контуром 18, 21, 79, 73–78, 53, 23

Таблица 4.3 – Номинальные величины элементов блока фильтров

Резисторы		Дроссели		Конденсаторы	
Обозначение	Значение, Ом	Обозначение	Значение, Гн	Обозначение	Значение, мкФ
$R1$	170	$L1$	1,5	$C1$	20
$R2$	170	$L2$	1,8	$C2$	40
$R3$	170	$L3$	2,0	$C3$	60
$R4$	170	$L4$	2,0	$C4$	80
$R5$	170	$L5$	1,5	$C5$	80
$R6$	170	$L6$	1,2	$C6$	100
				$C7$	100
				$C8$	100

Все характеристики лабораторного стенда могут быть исследованы с помощью панели приборов. Назначение и технические данные измерительных приборов приведены в таблице 4.4.

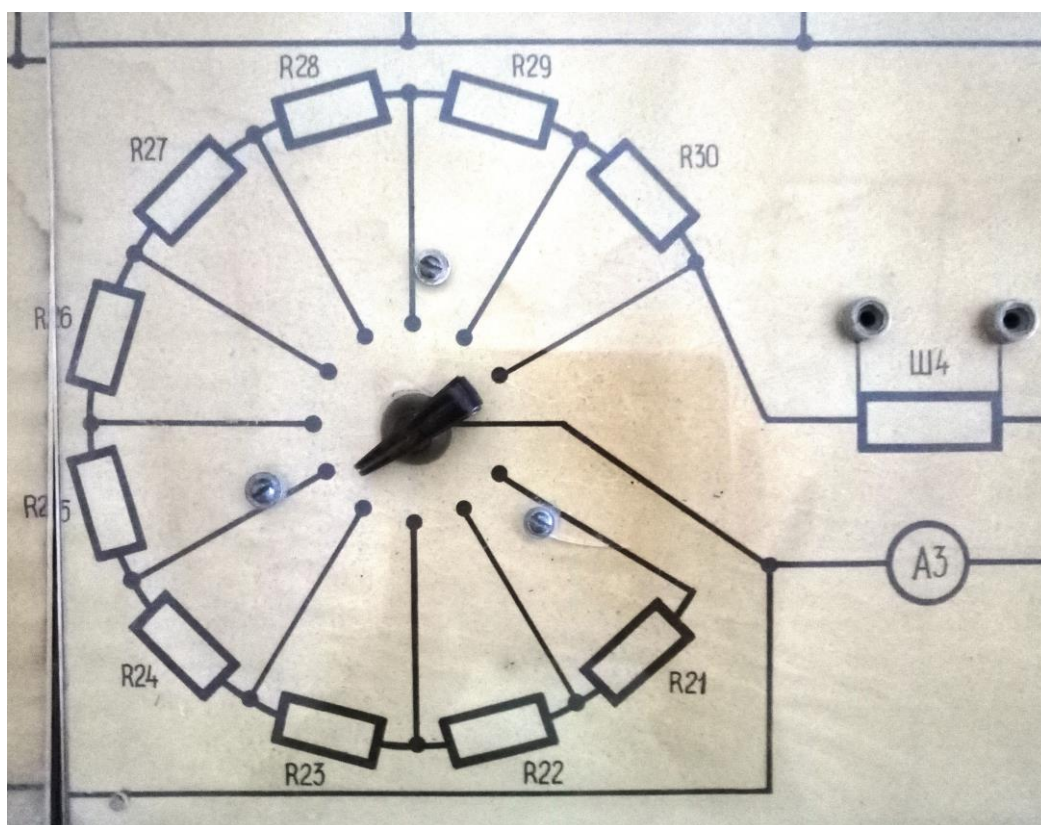


Рисунок 4.6 – Нагрузочная часть схемной панели

Таблица 4.4 – Технические данные измерительных приборов

Обозначение на схеме	Тип прибора	Класс прибора	Пределы измерения	Измеряемая величина	Примечание
<i>PV1</i>	Э378	1.5	(0-250) В	U_1	
<i>PV2</i>	Э378	1.5	(0-250) В	U_2	
<i>PV4</i>	М366	1.0	(0-300)В	U'_d (U_d)	имеется переключатель
<i>PV5</i>	В7-27А	—	(0-100)В	$U'_{вд}$ ($U_{вд}$)	имеется переключатель
<i>PA1</i>	Э30	1.5	(0-1) А	I_1	
<i>PA2</i>	Э378	1.5	(0-1) А	I_2	
<i>PA3</i>	М362	1.5	(0-500) мА	I_d	
—	С1-93	3	—	—	2 луча

Прибор (рис.4.7) *PV1* позволяет измерять действующее значение фазного напряжения сетевой обмотки трансформатора, а *PV2* – действующее значение фазного напряжения вентильной обмотки.

В первичной обмотке подключен амперметр *PA1* для измерения действующего значения переменного тока в фазе сетевой обмотки трансформатора, *PA2* – в фазе вентильной обмотки. Амперметр *PA3* измеряет среднее значение тока в нагрузке. Вольтметр *PV4* измеряет среднее значение напряжения на выходе выпрямителя в положении 1 переключателя *K1* и среднее значение напряжения на нагрузке в положении 2 переключателя *K1*. Вольтметр *PV5* измеряет действующее значение переменной составляющей напряжения на выходе выпрямителя в положении 1 переключателя *K1* и действующее значение переменной составляющей напряжения на нагрузке в положении 2 переключателя *K1*.



Рисунок 4.7 – Измерительные приборы лабораторного стенда

Также лабораторный стенд оборудован двухлучевым осциллографом типа С1-93 (рис.4.8) для снятия характеристик в различных точках работы схемы в зависимости от задания.



Рисунок 4.8 – Осциллограф

Осциллограммы токов схемы снимают с помощью шунтов Ш1–Ш4, включенных в соответствующие цепи схемы.

5. ПРОГРАММА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1 Исследование пассивной нагрузки

1. Замыкая с помощью перемычек и проводников нужные гнезда на обесточенном стенде, собрать питающую цепь, нагрузку и силовую схему преобразователя в соответствии с заданием преподавателя.

2. Подключить щуп осциллографа на выход вентильной части НВ;

3. Показать результат преподавателю для проверки.

4. Под контролем преподавателя включить левый автомат питания на силовом щите стенда, подав питающее напряжение на силовую часть схемы.

5. Включить питание осциллографа и проверить его калибровку.

6. Убедиться в корректности работы собранной схемы по показаниям осциллографа и измерительных приборов.

7. Изменяя положение переключателя на нагрузке, выставить максимально возможное сопротивление нагрузки. Ток нагрузки, контролируемый амперметром $РАЗ$, должен быть при этом минимальным.

8. Снять показания приборов стенда для минимального тока нагрузки и занести их в таблицу экспериментальных данных (см. приложение А).

9. Изменяя положение переключателя на нагрузке, выставить минимально возможное сопротивление нагрузки. Ток нагрузки, контролируемый амперметром $РАЗ$, должен быть при этом максимальным.

10. Снять показания приборов стенда для максимального тока нагрузки и занести их в таблицу экспериментальных данных (см. приложение А).

11. Продолжить эксперимент и заполнить таблицу экспериментальных данных для других значений токов нагрузки, находящихся между минимальным и максимальным его значениями.

12. После окончания экспериментов показать заполненную таблицу данных преподавателю для проверки результатов.

13. Выключить стенд, левый автомат.

14. Замыкая с помощью перемычек и проводников нужные гнезда на обесточенном стенде, собрать заданную схему сглаживающего фильтра в соответствии с заданием преподавателя и подключить его между выходной цепью неуправляемого выпрямителя и нагрузкой.

15. Показать результат преподавателю для проверки.

16. Под контролем преподавателя включить правый автомат питания на силовом щите стенда, подав питающее напряжение на силовую часть схемы.

17. Убедиться в корректности работы собранной схемы по показаниям осциллографа и измерительных приборов.

18. Выполнить пункт 8–14 данной программы исследований;

19. Выполнить пункт 15–19 данной программы исследований для всех заданных преподавателем типов сглаживающих фильтров;

20. Под руководством преподавателя произвести осциллографирование в контрольных точках работы схемы. Перечень необходимых осциллограмм приведен в приложении А.

21. Выключить стенд, отключая правый автомат.

22. При оформлении отчёта о проведении лабораторной работы, заполнить расчетными данными таблицу, приведенную в приложении Б, построить заданные преподавателем зависимости. Расчетные формулы и ориентировочный перечень зависимостей приведен в приложении Б.

6. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ СХЕМ

6.1 Основные положения

Выпрямители предназначены для преобразования энергии источника переменного напряжения промышленной сети в энергию постоянного напряжения на нагрузке.

В зависимости от типа источника переменного напряжения выпрямители могут быть однофазными и трёхфазными. В данной лабораторной работе исследуются сглаживающие фильтры в схемах неуправляемых выпрямителей, питающихся или от однофазного или от трёхфазного источника переменного напряжения. Неуправляемым выпрямитель называется, если в процессе его работы не регулируется выходное напряжение. Силовые схемы однофазного НВ в данной лабораторной работе могут быть собраны по однопульсной нулевой или мостовой схеме, а трёхфазного НВ – по трехпульсной нулевой или мостовой схеме.

6.2 Однофазные неуправляемые выпрямители

Рассмотрим работу наиболее распространённых однофазных схем неуправляемых выпрямителей – однопульсной нулевой и двухпульсной мостовой.

6.2.1 Однофазный однопульсный нулевой неуправляемый выпрямитель

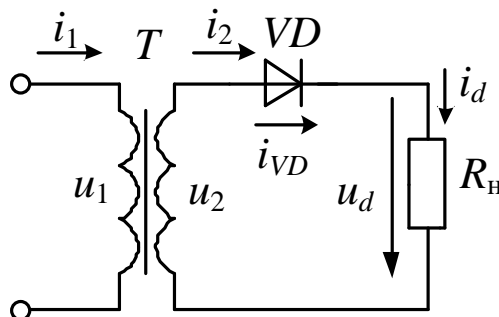


Схема однофазного однополупериодного выпрямителя и временные диаграммы работы схемы представлена на рис. 6.1. и рис. 6.2 соответственно.

На схеме приняты следующие обозначения напряжений и токов:

Рисунок 6.1 – Однофазный однопульсный нулевой неуправляемый выпрямитель

вентильной обмоток трансформатора;

- i_1, i_2 – мгновенные значения токов сетевой и вентильной обмоток трансформатора;

- i_{VD} – мгновенный ток диода VD ;

- u_d – мгновенное значение выпрямленного напряжения;

- i_d – мгновенное значение выпрямленного тока.

Анализ работы схемы выполнен без учёта потерь напряжения на активном сопротивлении обмоток трансформатора и динамическом сопротивлении открытого диода.

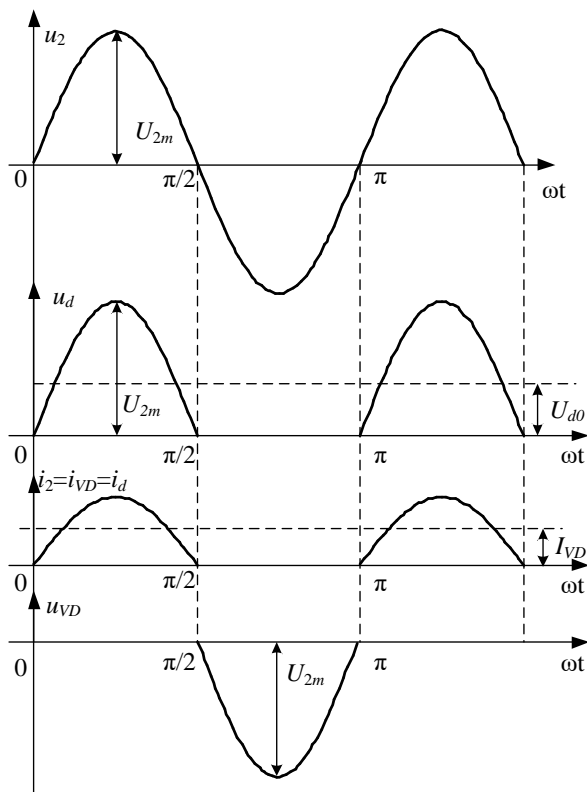


Рисунок 6.2 – Временная диаграмма работы однофазного однопульсного нулевого выпрямителя

Под действием переменного напряжения $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$ вентильной обмотки ток в цепи нагрузки протекает только в положительный полупериод напряжения, когда анод диода имеет положительный потенциал относительно катода. В отрицательный полупериоды напряжения, когда потенциал анода становится отрицательным, ток в цепи равен нулю.

Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{d0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{\pi} = 0,45 \cdot U_2, \quad (6.1)$$

где U_2 – действующее значение напряжения на вентильной обмотке трансформатора.

Максимальное обратное напряжение на диоде достигает амплитудного значения напряжения вентильной обмотки U_{2m} :

$$U_{VD \max} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \pi \cdot U_{d0}. \quad (6.2)$$

Среднее значение выпрямленного тока (а также тока диода):

$$I_{d0} = I_{VD} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_2}{\pi}, \quad (6.3)$$

где I_2 – действующее значение тока вентильной обмотки трансформатора.

По найденным величинам I_{VD} , и $U_{VD \max}$ выбирается диод для работы в схеме. Переменная составляющая выпрямленного напряжения и тока для данной схемы, как следует из временных диаграмм (рис.6.2), велика, причем основная гармоника пульсаций имеет частоту, равную частоте питающей сети.

Для оценки качества выпрямленного напряжения вводят понятие коэффициента пульсации равного отношению амплитуды основной гармоники выпрямленного напряжения к его среднему значению:

$$K_{\pi}' = \frac{U_{(1)m}}{U_{d0}}. \quad (6.4)$$

И для однофазной однопульсной нулевой схемы равен $\pi/2$ или 1,57.

В сердечнике трансформатора за счет постоянной составляющей тока вентильной обмотки создается добавочный постоянный магнитный поток, насыщающий сердечник трансформатора. Это явление принято называть вынужденным намагничиванием (подмагничиванием) трансформатора.

В результате подмагничивания намагничивающий ток трансформатора возрастает в несколько раз по сравнению с током при нормальном режиме работы (без подмагничивания). Возрастание намагничивающего тока требует увеличивать сечение провода сетевой обмотки и размера трансформатора в целом.

Основное преимущество однопульсного нулевого выпрямителя – простота схемы.

Недостатки: большие размеры и вес трансформатора, значительная величина обратного напряжения на диоде, большие пульсации, наличие вынужденного намагничивания.

Однопульсный нулевой выпрямитель из-за перечисленных недостатков применяется достаточно редко, в основном в маломощных устройствах.

6.2.2 Однофазный двухпульсный мостовой неуправляемый выпрямитель

Наиболее широкое применение находит однофазная мостовая схема выпрямителя (рис.6.3).

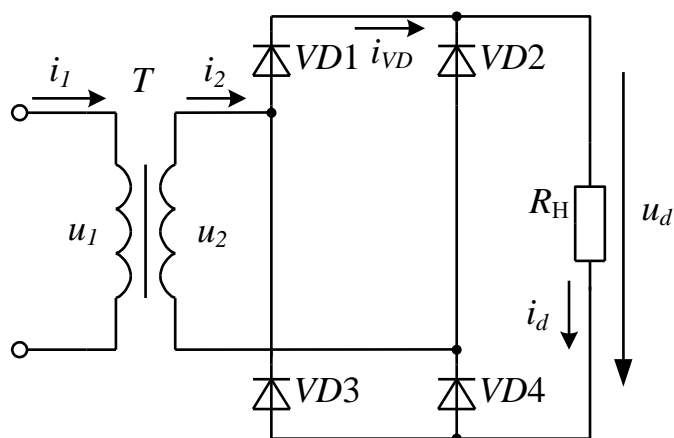


Рисунок 6.3 – Схема мостового неуправляемого выпрямителя

Диоды образуют мост, в одну диагональ которого включена вентильная обмотка трансформатора, а в другую – нагрузочный резистор R_n . Каждая пара диодов работает поочередно. При положительной полуволне напряжения u_2 открыты диоды $VD1$ и $VD4$. При этом ток в нагрузке

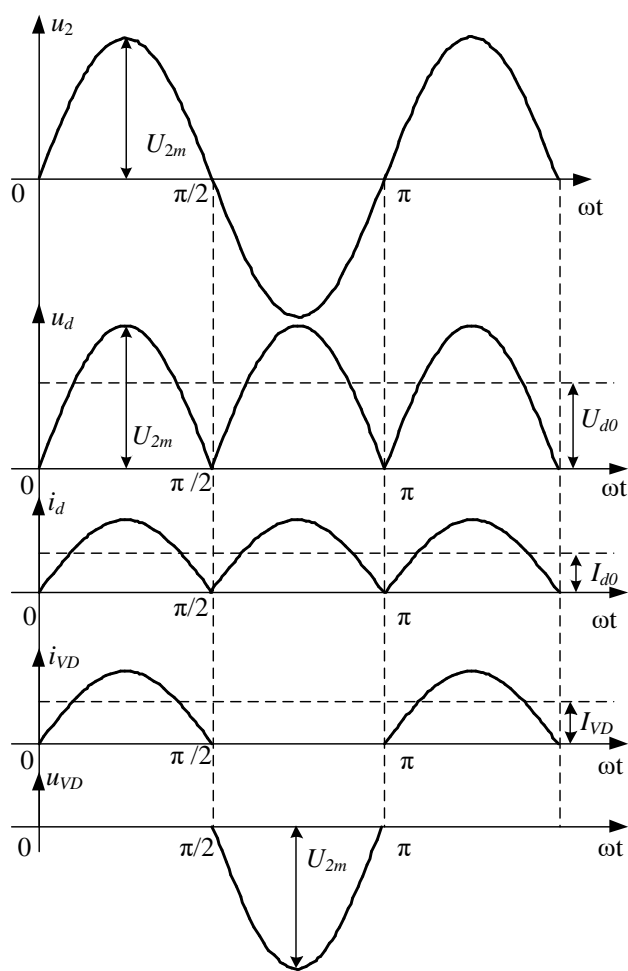


Рисунок 6.4 – Временная диаграмма работы однофазного мостового выпрямителя

протекает по контуру через вентиляющую обмотку трансформатора, диод $VD1$, резистор нагрузки R_H и диод $VD4$. В следующий полупериод u_2 ток проходит через диод $VD2$, нагрузку и диод $VD3$. Следовательно, в цепи нагрузки ток i_d протекает в одном направлении в течение всего периода. Основные временные диаграммы в данной схеме приведены на рис. 6.4.

Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_2}{\pi} = 0,9 \cdot U_2. \quad (6.5)$$

Действующее значение напряжения на входе выпрямителя:

$$U_2 = \frac{\pi \cdot U_{d0}}{2\sqrt{2}} = 1,11 \cdot U_{d0}. \quad (6.6)$$

Максимальное обратное напряжение на диоде достигает

амплитудного значения напряжения вентиляющей обмотки:

$$U_{VD\max} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \frac{\pi}{2} \cdot U_{d0}. \quad (6.7)$$

Среднее значение тока через диод:

$$I_{VD} = \frac{I_{d0}}{2}. \quad (6.8)$$

Коэффициент пульсации для однофазной мостовой схемы:

$$K_n' = \frac{U_{(1)m}}{U_{d0}} \cong \frac{2}{m^2 - 1}, \quad (6.9)$$

где m – пульсность схемы.

K_n' составляет 0.67. Подмагничивания сердечника трансформатора нет, что является существенным преимуществом данной схемы. Однако мостовая схема требует большего количества диодов.

6.3 Трёхфазные неуправляемые выпрямители

Рассмотрим работу наиболее распространённых трёхфазных схем неуправляемых выпрямителей – трехпульсной нулевой и шестипульсовой мостовой.

6.3.1 Трёхфазный трёхпульсный нулевой неуправляемый выпрямитель

Простейшей схемой трёхфазного неуправляемого выпрямителя является нулевая схема, представленная на рис.6.5а.

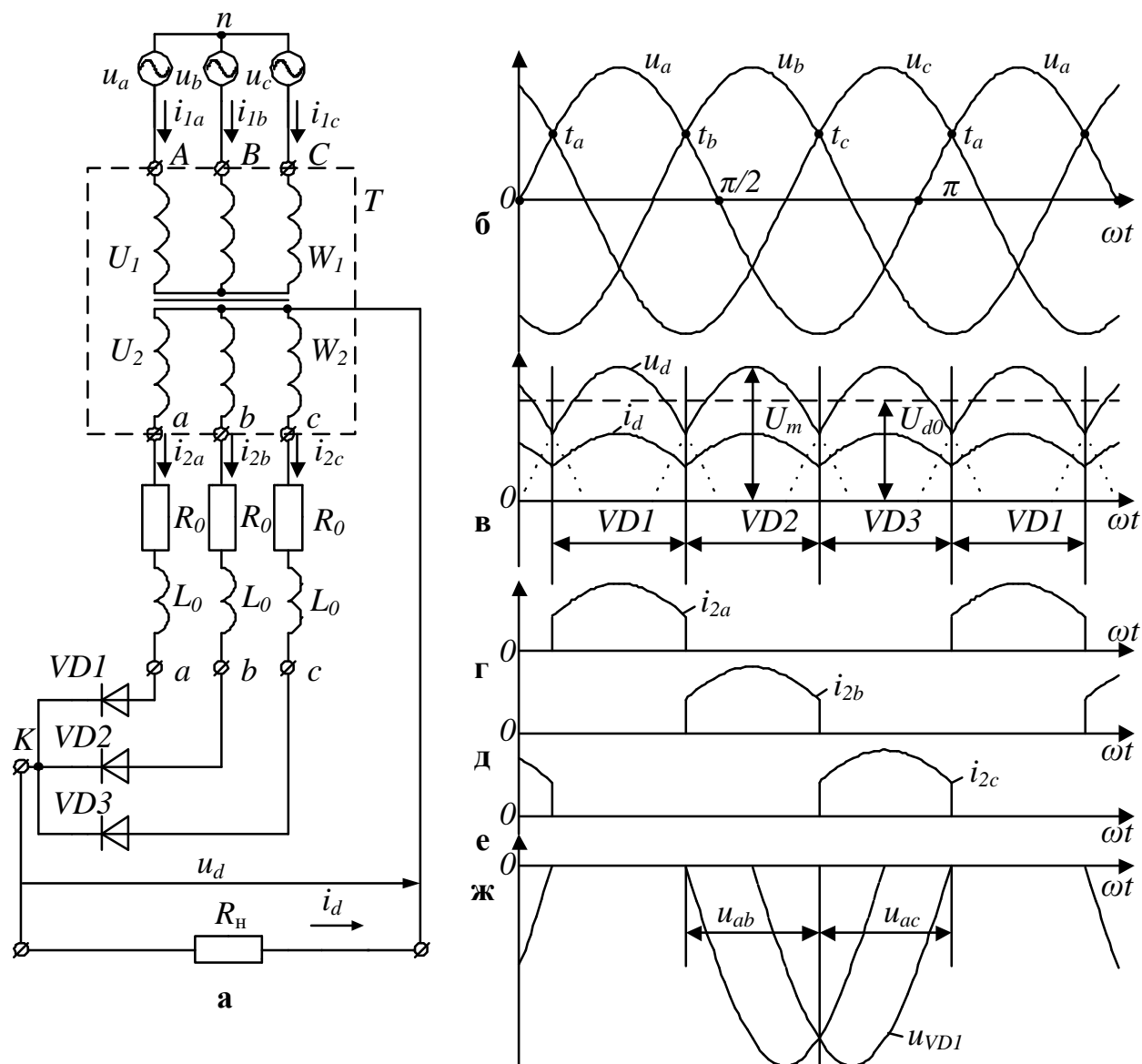


Рисунок 6.5 – Трёхфазный трёхпульсный нулевой неуправляемый выпрямитель

Схема включает: трёхфазный источник переменного напряжения; преобразовательный трансформатор T , вторичная (вентильная) обмотка которого соединяется в звезду или зигзаг с выводом нулевого провода; сопротивление R_0 и индуктивность L_0 , которые имитируют активное и индуктивное сопро-

тивление соединительных кабелей; три диода, включенные последовательно в каждую из фаз вентильной обмотки трансформатора и соединённые в общую точку катодами (или анодами); нагрузку, включенную между общей точкой соединения катодов (или анодов) вентиля и нулевым выводом вентильной обмотки преобразовательного трансформатора.

Работа схемы: диоды, поочерёдно открываясь, прикладывают к нагрузке участки фазных напряжений вентильной обмотки преобразовательного трансформатора, формируя из них кривую выходного напряжения схемы (рис.6.5 б, в).

Потенциалы анодов диодов в схеме определяет изменяющееся по синусоидальному закону трёхфазное переменное напряжение питающей сети, трансформированное в вентильную обмотку (см. рис.6.5, б). Т.е. в любой момент времени в схеме (см. рис. 6.5, а) будет открыт лишь один диод, потенциал анода которого будет больше, чем у двух других в соответствии с диаграммой распределения потенциалов трёхфазного переменного напряжения (см. рис. 6.5, б).

Переключение диодов будет происходить в так называемой **точке естественной коммутации** – моменте времени, когда потенциал анода диода становится больше потенциала его катода по условию работы схемы. Для трёхфазных схем – это момент времени, когда потенциал соответствующей фазы станет больше, чем у двух других, – моменте пересечения фазных синусоид в положительной (при соединении диодов катодами) полярности (см. рис. 6.5, б). При соединении диодов анодами это будут моменты пересечения фазных синусоид в отрицательной полярности.

Каждый диод будет открыт в течение трети периода напряжения питающей сети, т.е. 120 эл. град., и закроется с открытием очередного диода в схеме.

В случае чисто активной нагрузки её ток будет повторять по форме напряжение на ней, а ток фазы вентильной обмотки преобразовательного трансформатора формироваться из участка тока нагрузки на интервале открытого состояния диода. Таким образом, ток фаз вентильной обмотки преобразовательного трансформатора в схеме (см. рис. 6.5, а) однополярный и протекает на одном полупериоде напряжения питающей сети в течение 120 эл. град. Это вызывает эффект одностороннего подмагничивания трансформатора, для борьбы с которым вентильную обмотку чаще всего соединяют в зигзаг.

На аноде каждого вентиля всегда (см. рис. 6.5, а–в) действует напряжение соответствующей фазы, а к катоду будет приложено напряжение той из фаз, диод которой открыт в данный момент времени. За период повторяемости напряжение на диоде будет состоять из трёх участков длительностью в 120 эл. град.: интервалу напряжения, соответствующему падению на открытом диоде и двух участков линейного напряжения.

Максимальное обратное напряжение на диоде:

$$U_{VD\max} = \sqrt{3}U_{2\phi m} = \sqrt{6} \cdot U_{2\phi} = \frac{2\pi}{3} \cdot U_{d0}, \quad (6.10)$$

где $U_{2\phi}$ — действующее значение фазного напряжения на вентильной обмотке трансформатора, а $U_{2\phi m}$ — максимальное значение фазного напряжения (его амплитуда) на вентильной обмотке трансформатора.

Средний ток диода будет равен трети среднего тока нагрузки:

$$I_{VD} = \frac{I_{d0}}{3}. \quad (6.11)$$

Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке схемы находят интегрированием кривой мгновенного выходного напряжения за интервал повторности и для схемы рис. 6.5, а будет равно:

$$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} U_{2\phi m} \cos \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} U_{2\phi}. \quad (6.12)$$

Коэффициент пульсации для данной схемы по выражению (6.9) $K_{\pi} = 0,25$, а частота пульсации равна утроенной частоте сети.

Схема трёхфазного трёхпульсного выпрямителя является простейшей трёхфазной схемой и имеет существенные недостатки: необходимость использования преобразовательного трансформатора с выводом нулевой точки вентильных обмоток; одностороннее подмагничивание сердечника преобразовательного трансформатора однополярным током, протекающим в его вентильных обмотках; плохое использование трансформатора по напряжению.

6.3.2 Трёхфазный шестипульсный мостовой неуправляемый выпрямитель

Недостатков, присущих трёхфазной нулевой схеме, практически лишена схема, приведенная на рис. 6.6, а.

Схема включает: трёхфазный источник переменного напряжения; преобразовательный трансформатор T ; сопротивление R_0 и индуктивность L_0 , которые имитируют активное и индуктивное сопротивление соединительных кабелей; трёхфазный мостовой коммутатор, содержащий две трёхпульсные вентильные группы ВГк и ВГа с соединением трёх вентилей общими катодами и анодами соответственно; нагрузку, включенную между общими точками соединения катодов и анодов вентильных групп ВГк и ВГа.

Работа схемы: в каждой вентильной группе схемы (см. рис. 6.6, а) диоды работают поочередно, переключаясь в соответствии с диаграммой фазных напряжений аналогично схеме рис. 6.5, а. При этом для ВГк отпирающими являются положительные полуволны фазных напряжений вентильных обмоток преобразовательного трансформатора, а для ВГк — отрицательные. Длительность открытого состояния диода также составляет 120 эл. град. Напряжение на нагрузке формируется как разность выходных напряжений двух вентильных групп, т.е. линейными напряжениями. Ток нагрузки при этом протекает одновременно через две вентильные группы, т.е. через две

фазы источника питания и два последовательно включенных диода – по одному из каждой вентильной группы. Ток каждой фазы источника формируется из участков тока нагрузки на интервалах проводимости диодов данной фазы: из ВГк – в положительном направлении, а из ВГа – в отрицательном и имеет, соответственно, переменный характер (см. рис. 6.6, г).

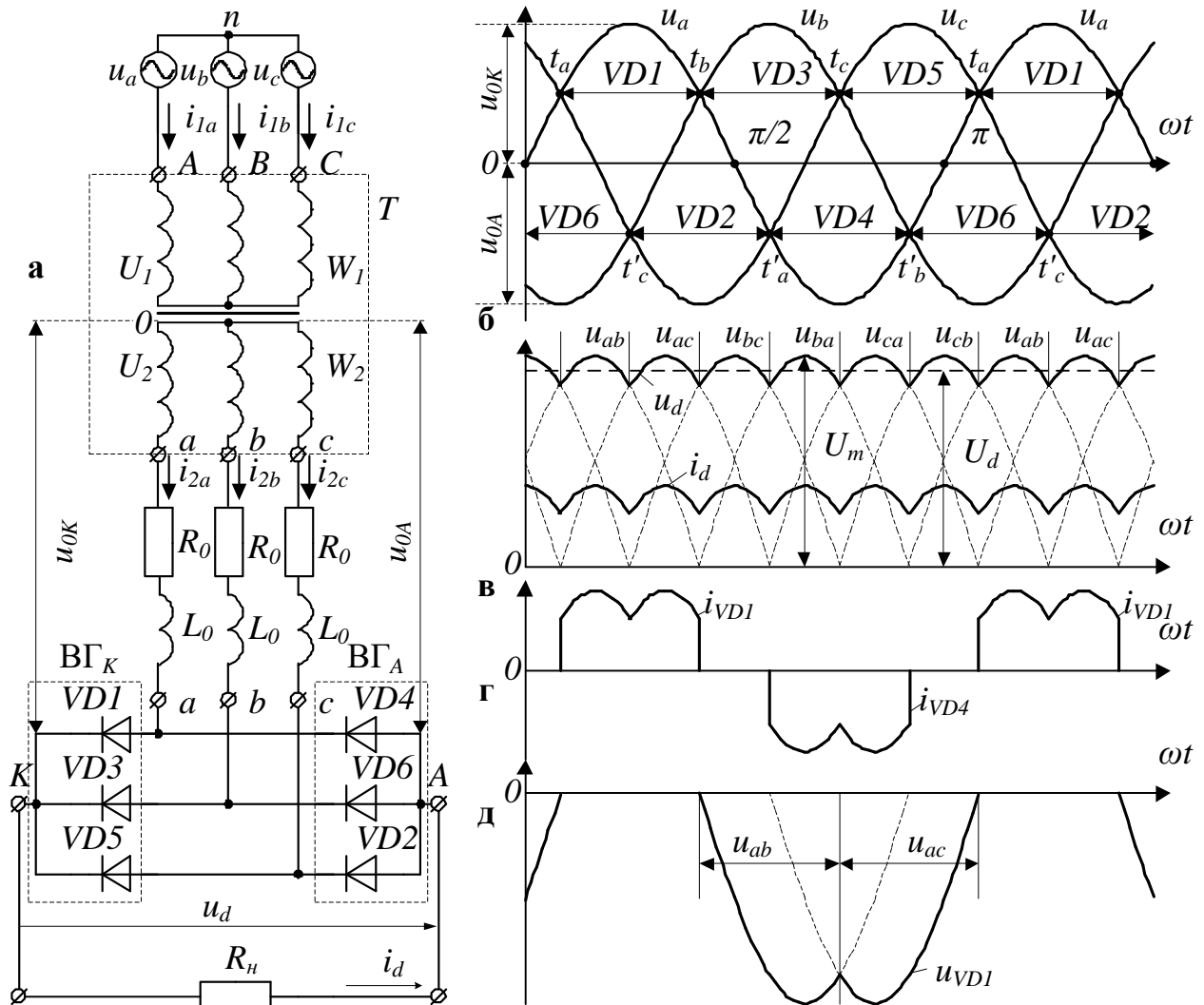


Рисунок 6.6 – Трёхфазный шестипульсный мостовой неуправляемый выпрямитель

Обратное напряжение на диоде и его средний ток формируется аналогично схеме рис. 6.5, а.

Максимальное обратное напряжение на диоде:

$$U_{VD\max} = U_{2.m} = \sqrt{2}U_{2.l} = \frac{\pi}{3} \cdot U_{d0}, \quad (6.13)$$

где $U_{2.l}$ — действующее значение линейного напряжения на вентильной обмотке трансформатора, а $U_{2.m}$ — максимальное значение фазного напряжения (его амплитуда) на вентильной обмотке трансформатора.

Средний ток диода будет равен трети среднего тока нагрузки:

$$I_{VD} = \frac{I_{d0}}{3}. \quad (6.14)$$

Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке схемы рис. 6.6,а равно:

$$U_{d0} = \frac{6}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} U_{2.m} \cos \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2л}. \quad (6.15)$$

В сравнении со схемой нулевого выпрямителя мостовая схема обладает рядом существенных преимуществ, а именно: хорошая пульсность $m = 6$ снижает амплитуду пульсаций в выходном напряжении схемы; хорошее использование преобразовательного трансформатора за счёт формирования выходного напряжения в нагрузке из участков линейных напряжений; отсутствие подмагничивания трансформатора. Это привело к широкому распространению мостовых схем в современной промышленности.

6.4 Сглаживающие фильтры

Сглаживающие фильтры предназначены для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения и тока и содержат реактивные элементы (L или C), способные накапливать энергию, а затем ее отдавать в нагрузку.

На рис.6.7 приведены простейшие сглаживающие фильтры, подключаемые между выпрямителем и нагрузкой.

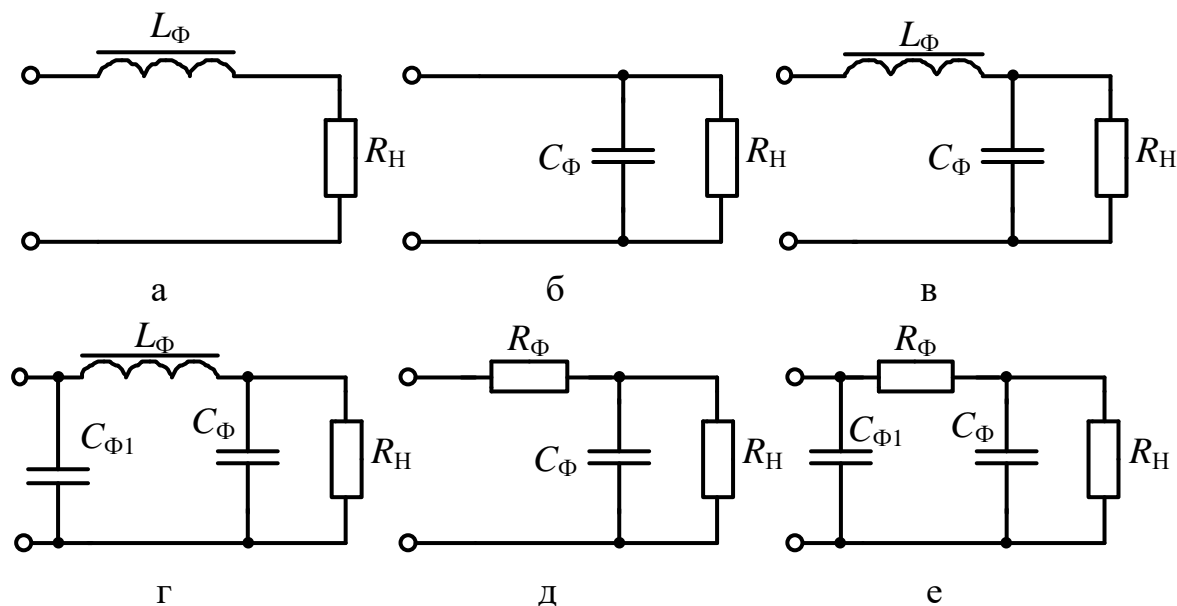


Рисунок 6.7 – Схемы сглаживающих фильтров

В выпрямителях средней и большой мощности часто используют индуктивный фильтр. В нем используется дроссель L_{ϕ} , который включается последовательно с нагрузкой $R_{\text{н}}$ (см. рис.6.7, а). Дроссель чаще всего имеет ферромагнитный сердечник с немагнитным зазором. Сущность работы данного фильтра сводится к тому, что при увеличении выходного напряжения выпрямителя происходит накопление энергии в индуктивности L_{ϕ} , а при его

уменьшении, за счет возникшей э.д.с. самоиндукции дросселя, ток в нагрузке будет мало меняться. Таким образом, будет происходить сглаживание формы кривой тока нагрузки и, как следствие, сглаживание кривой напряжения на активной нагрузке. Так как изменение динамики выходного напряжения выпрямителя происходит чётное количество раз за период его работы, индуктивный фильтр практически не изменяет (без учёта потерь в фильтре) среднее значение напряжения нагрузки и не оказывает влияния на алгоритм переключения диодов в схеме. Изменится лишь форма потребляемого из сети тока: формируемый из участков тока нагрузки на интервале проводимости диодов он будет иметь форму, близкую к прямоугольной.

Индуктивность L_Φ выбирается из условия $\omega_{(1)}L_\Phi \gg R_n$, где $\omega_{(1)}$ – угловая частота первой гармоники пульсации. При выполнении указанного условия практически вся переменная составляющая выпрямленного напряжения будет падать на дросселе, а постоянная составляющая полностью передаваться в нагрузку.

В ёмкостном фильтре (см. рис.6.7, б) необходимо выполнить условие $1/\omega_{(1)}C_\Phi \ll R_n$. В этом случае переменная составляющая напряжения будет замыкаться через конденсатор C_Φ , а постоянная составляющая поступает в нагрузку.

Из приведенных неравенств, следует, что индуктивный фильтр более эффективен при больших токах нагрузки (малых R_n), а ёмкостной – при малых токах (больших R_n).

Индуктивно-ёмкостные фильтры (Г-образные LC и П-образные CLC) широко применяются при повышенных токах нагрузки, поскольку падение напряжения на них можно сделать сравнительно небольшим. Коэффициент полезного действия у таких фильтров достаточно высокий. К недостаткам индуктивно-ёмкостных фильтров относятся: большие габаритные размеры и масса, повышенный уровень электромагнитного излучения от элементов фильтра, сравнительно высокая стоимость и трудоемкость изготовления.

Наиболее широко используется Г-образный LC -фильтр (см. рис. 6.7, в). Для эффективного сглаживания пульсаций таким фильтром необходимо выполнение следующих условий: $1/\omega_{(1)}C_\Phi \ll R_n$ и $\omega_{(1)}L_\Phi \gg R_n$.

П-образный CLC -фильтр отличается от Г-образного LC -фильтра наличием еще одной ёмкости, включаемой на входе фильтра (см. рис. 6.7, г). Расчет таких фильтров производят в два этапа, сначала рассчитывают ёмкость конденсатора $C_{\Phi 1}$, исходя из допустимой величины пульсации напряжения на нем, затем по приведенным выше формулам рассчитывают Г-образное звено. Наибольший коэффициент сглаживания в П-образном фильтре достигается при $C_{\Phi 1} = C_\Phi$.

Резистивно-ёмкостные фильтры целесообразно применять при малых токах нагрузки (менее 10 – 15 мА) и небольших требуемых коэффициентах сглаживания.

Простейший Г-образный RC -фильтр (см. рис.6.7, д) состоит из конденсатора C_Φ шунтирующего нагрузку по переменной составляющей напряжения, которая дополнительно ограничивается сопротивлением резистора R_Φ . В

результате доля переменной составляющей в выпрямленном напряжении значительно уменьшается. Недостатком RC -фильтра является потеря мощности на резисторе R_ϕ , что снижает КПД фильтра. Поэтому RC -фильтры целесообразно использовать в выпрямителях при малых токах нагрузки.

Расчет Π -образного резистивно-емкостного фильтра (см. рис. 6.7, е) производится, как и в случае Π -образного CLC фильтра, в два этапа после деления этого фильтра на емкостный ($C_{\phi 1}$) и Γ -образный RC фильтр.

Основным параметром, характеризующим эффективность действия сглаживающего фильтра, является коэффициент сглаживания, равный отношению коэффициентов пульсаций K'_Π и K_Π на входе и выходе фильтра:

$$K_{сг} = \frac{K'_\Pi}{K_\Pi} = \frac{U'_{вм}/U'_d}{U_{вм}/U_d} = K_\phi \eta_\phi, \quad (6.16)$$

где U'_d – напряжение на входе фильтра;

U_d – напряжение на выходе фильтра;

$U'_{вм}$, $U_{вм}$ – амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения на входе и выходе фильтра;

K_ϕ – коэффициент фильтрации фильтра;

$\eta_\phi = \frac{U_d}{U'_d}$ – коэффициент передачи постоянной составляющей с входа

фильтра на его выход, характеризующий потерю напряжения в фильтре и являющийся его КПД (для фильтров большой мощности $\eta_\phi=0,99$, а для малой мощности – $\eta_\phi = (0,50 - 0,90)$).

Пренебрегая потерями в фильтре, можно считать:

$$K_{сг} \approx \frac{U'_{вм}}{U_{вм}} = K_\phi \quad (6.17)$$

6.4.1 Работа выпрямителя с емкостным фильтром

В маломощных выпрямителях часто используют простейший емкостной фильтр, который представляет собой конденсатор, подключаемый параллельно нагрузке. Такой фильтр для выпрямителя представляет емкостную нагрузку, которая заметно изменяет характер процессов в схеме. Рассмотрим работу простейшего однофазного однополупериодного выпрямителя при наличии емкостного фильтра. Схема данного выпрямителя и временные диаграммы, характеризующие его работу, приведены на рис.6.8.

В интервале времени t_1-t_2 (см. рис.6.8 б) мгновенное значение напряжения вентильной обмотки трансформатора u_2 больше мгновенного напряжения нагрузки u_H , диод $VD1$ открыт и конденсатор C_ϕ заряжается от источника питающего напряжения. Через диод $VD1$ протекает сумма тока нагрузки и тока заряда конденсатора, т.е. $i_{VD} = i_C + i_H$. При этом происходит падение напряжения на эквивалентном сопротивлении контура заряда r_3 (диоде и активном сопротивлении обмоток трансформатора) $\Delta u = i_2 r_3$. Таким образом,

конденсатор заряжается по кривой, отличной от формы u_2 на величину паде-

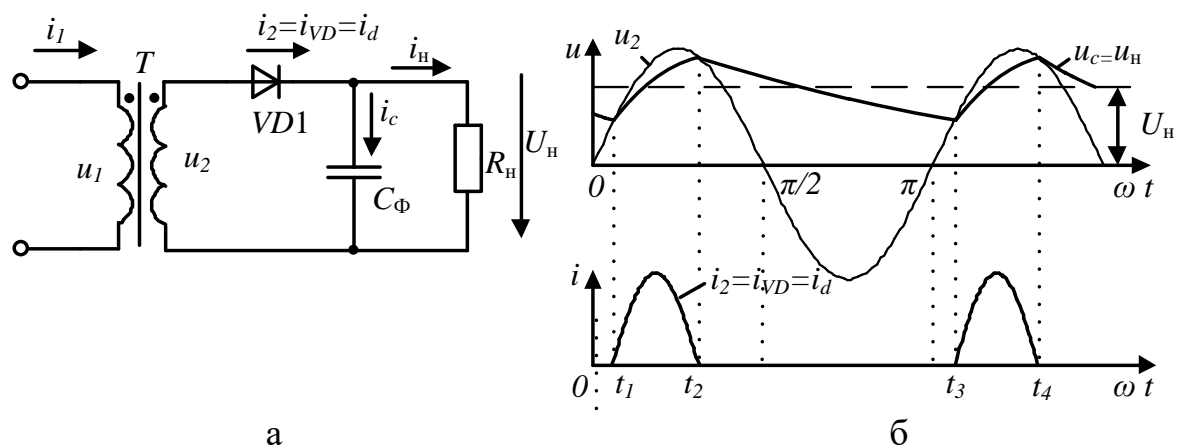


Рисунок 6.8 – Схема однофазного однотоктного выпрямителя с С-фильтром (а) и временные диаграммы напряжений и токов выпрямителя (б)

ния напряжения в контуре заряда Δu .

В момент времени t_2 изменяющееся по синусоидальному закону напряжение вентильной обмотки трансформатора u_2 становится равным, а в следующий момент времени – меньшим напряжения на нагрузке и параллельно подключенному с ней конденсатору $u_H = u_C$. Т.е. потенциал анода диода $VD1$, определяемый напряжением u_2 , становится меньше потенциала его катода, определяемого напряжением u_C , и диод $VD1$ закрывается. *Нагрузка отключается от источника питающего напряжения.*

В интервале времени t_2-t_3 конденсатор разряжается на нагрузку по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau = R_H C_\Phi$, поддерживая в ней неизменный ток (см. рис.6.8 б).

В момент t_3 мгновенное значение напряжения вентильной обмотки трансформатора u_2 становится равным, а затем и большим напряжения на конденсаторе u_C . Для диода $VD1$ начинает выполняться условие открытого состояния и он открывается, *подключая источник питающего напряжения к нагрузке.* В интервале времени t_3-t_4 конденсатор заряжается. Далее процесс повторяется.

Мгновенное напряжение на нагрузке определяется кривыми заряда и разряда конденсатора, которые зависят от формы напряжения источника питания и постоянных времени цепей заряда и разряда конденсатора (суммарных активных сопротивлений в контурах заряда и разряда). Форма кривой тока нагрузки i_H повторяет форму кривой напряжения нагрузки u_H . Форма кривой тока диодов отличается от формы кривой при работе на чисто активную нагрузку: время протекания тока уменьшается, а его амплитуда возрастает из-за необходимости передать в нагрузку ту же энергию за меньший интервал времени.

6.4.2 Г-образный LC-фильтр с резонансным контуром

Резонансные сглаживающие фильтры используются на выходе выпрямительных устройств, в которых переменная составляющая выпрямленного напряжения близка по уровню к первой гармонике. Также они используются для аппаратуры, которая не чувствительна к высшим гармоническим составляющим напряжения. При больших отклонениях частоты питающего напряжения происходит “расстройка” относительно собственной частоты контура, что ухудшает сглаживающие свойства фильтра. Поэтому не допускается использование таких фильтров при больших отклонениях частоты питающего напряжения. Изменение тока нагрузки приводит к изменению индуктивности контура, что также уменьшает значение коэффициента сглаживания. Для исключения этого явления в дроссель вводят зазор или обмотку обратной связи, поддерживающую постоянство индуктивности. Последнее приводит к громоздкости фильтра и уменьшению его КПД, поэтому рекомендуется использовать такие фильтры при постоянстве тока нагрузки. Для подавления гармонических составляющих напряжения, кроме первой, используют дополнительные реактивные элементы. По сравнению с другими пассивными сглаживающими фильтрами этот тип фильтров менее громоздкий и имеет больший КПД.

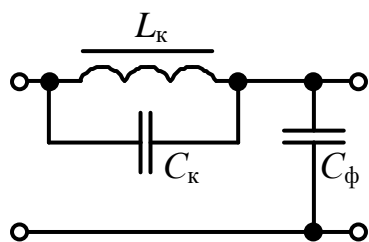


Рисунок 6.9 – Фильтр с параллельным колебательным контуром (фильтр “пробка”)

В резонансном сглаживающем фильтре используется колебательный контур, настроенный на частоту пульсаций. Фильтр (контур) настраивается на частоту первой гармоники и создается большее сопротивление для ее прохождения. Конденсатор $C_Ф$ сглаживает гармоники высших порядков.

Условие резонанса токов, для определения индуктивности и емкости резонансного контура:

$$\frac{1}{\omega_0 L_K} = \omega_0 C_K, \quad (6.18)$$

откуда

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_K L_K}} = 2\pi f_0 = 2\pi f_c. \quad (6.19)$$

Основное достоинство резонансного фильтра – более высокий коэффициент сглаживания, чем у ранее описанных LC-фильтров. К недо-

статкам относятся зависимость коэффициента сглаживания от частоты сети, зависимость индуктивности дросселя от тока нагрузки и малое значение коэффициента сглаживания для высших гармоник выпрямленного тока. Для ослабления напряжения высших гармоник последовательно с основным резонансным контуром включается ряд контуров, настроенных на их частоты.

6.4.3 Внешние характеристики выпрямителей

Внешней (нагрузочной) характеристикой выпрямителя называется зависимость среднего значения выпрямленного напряжения на нагрузке от среднего значения тока нагрузки $U_d = f(I_d)$.

На выходе выпрямителя без фильтра среднее значение напряжения на холостом ходу ($I_d = 0$) равно

$$U_{d0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t dt = 0,45U_2, \quad (6.20)$$

где U_2 – действующее значение напряжения на вентильной обмотке трансформатора.

При наличии тока I_d на внутреннем сопротивлении диода r_g и активном сопротивлении обмоток трансформатора $r_{тр}$ возникают падения напряжения, которые приводят к уменьшению напряжения U_d . При этом внешняя характеристика выпрямителя без фильтра определяется по формуле

$$U_d = U_{d0} - (r_g + r_{mp})I_d, \quad (6.21)$$

где U_{d0} – напряжение на выходе выпрямителя при $I_d = 0$.

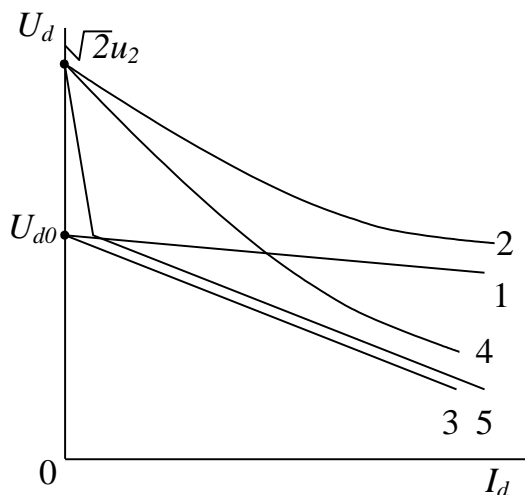


Рисунок 6.10 – Внешние характеристики выпрямителя

На рис.6.10 приведены внешние характеристики выпрямителя $U_d = f(I_d)$.

Кривая 1 изображает внешнюю характеристику без фильтра. По ее наклону можно определить внутреннее сопротивление выпрямителя

$$r_{вн} = \Delta U_d / \Delta I_d. \quad (6.16)$$

Кривая 2 соответствует выпрямителю с C-фильтром. При $I_d = 0$ напряжение $U_{d0} = \sqrt{2}U_2$, так как в отсутствии тока I_d конденсатор C_ϕ заряжается до амплитудного значения напряжения вентильной обмотки. С ростом тока I_d кривая 2 спадает быстрее, чем кри-

вая 1, что объясняется уменьшением постоянной времени $\tau = R_n C_\phi$. Это обычно считается недостатком, поэтому фильтр с ёмкостной реакцией лучше применять при неизменном или мало меняющемся сопротивлении R_n .

Прямая 3 на рис. 6.10 соответствует внешней характеристике выпрямителя, работающего с индуктивным фильтром. Кроме индуктивного, реальный фильтр имеет и активное сопротивление. Поскольку индуктивный фильтр с нагрузкой включен последовательно, наличие этой компоненты сопротивления фильтра эквивалентно увеличению значения внутреннего сопротивления выпрямителя. Поэтому внешняя характеристика выпрямителя с индуктивным фильтром представляется прямой линией, но имеющей больший наклон, чем характеристика без фильтра.

Внешняя характеристика RC -фильтра (кривая 4) имеет еще более крутой наклон, чем кривая 2. Это вызвано дополнительным падением напряжения на последовательно включенном резисторе R_ϕ (см. рис.6.7, д).

Внешняя характеристика выпрямителя с Γ -образным LC -фильтром (кривая 5) имеет существенное отличие от характеристики с индуктивным фильтром для режима холостого хода. В этом случае конденсатор заряжается до амплитудного значения напряжения вторичной обмотки трансформатора.

А внешняя характеристика с Π -образным LC -фильтром имеет примерно тот же наклон, что и с Γ -образным фильтром, но проходит несколько выше из-за входной емкости.

Внешняя характеристика с резонансным фильтром почти не отличается от характеристики Γ -образного LC -фильтра.

7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Объясните работу исследованной схемы неуправляемого выпрямителя без фильтра.
2. Объясните работу исследованной схемы неуправляемого выпрямителя с индуктивным фильтром.
3. Объясните работу исследованной схемы неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром.
4. Объясните работу исследованной схемы неуправляемого выпрямителя с Γ -образным и Π -образным LC фильтром.
5. Объясните работу исследованной схемы неуправляемого выпрямителя с Γ -образным и Π -образным RC фильтром.
6. Принцип действия резонансных фильтров и область их применения.
7. В каких случаях рекомендуется применять многозвенные фильтры?
8. Объясните ход внешней характеристики НВ с емкостным фильтром.
9. Объясните ход внешней характеристики НВ с индуктивным фильтром.
10. Объясните ход внешней характеристики НВ с Γ -образным и Π -образным LC фильтром.
11. Объясните ход внешней характеристики НВ с Γ -образным и Π -образным RC фильтром.

12. Объясните ход характеристики $K_n = f(I_d)$ для всех типов фильтров.
13. Объясните ход характеристики $K_\phi = f(I_d)$ для всех типов фильтров.
14. Какие требования предъявляются к измерительным приборам при проведении экспериментальных исследований фильтров?
15. В каких фильтрах могут возникнуть перенапряжения?
16. В каких фильтрах могут возникнуть сверхтоки?
17. Как влияют анодные резисторы на работу фильтров и их фильтрующие свойства?
18. Особенности работы дросселей сглаживающих фильтров.
19. Какие конденсаторы рекомендуют применять в фильтрах?
20. Недостатки исследованных фильтров.
21. Преимущества исследованных фильтров.
22. Объясните форму тока i_1 и i_2 при работе НВ с различными типами фильтров.
23. Объясните форму напряжения u_1 и u_2 при работе НВ с различными типами фильтров.
24. Объясните форму напряжения U_d и тока I_d при работе НВ с различными типами фильтров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по выполнению курсового проекта «Расчет многопульсных управляемых выпрямителей» по дисциплине «Преобразователи, ведомые сетью» и «Преобразователи для электропривода». / Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов. – Харьков.: НТУ"ХПИ", 2009. – 52с.
2. Забродин Ю. С. Промышленная электроника / Ю. С. Забродин. – М.: Высш. шк., 1982. – 496с.
3. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники / Г. С. Зиновьев – Новосибирск.: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
4. Руденко В. С. Основы преобразовательной техники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, Н. М. Чиженко – Высшая школа, 1980. – 424 с.
5. Semikron. Innovation + Service. Semikron International. Germany, 1997..
6. Шавьолкін О. О. Енергетична електроніка: навчальний посібник / О. О. Шавьолкін. – Київ :КНУТД, 2017. – 396 с.
7. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power Electronics. Converters, Application and Design. John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1995. – 802 p.
8. Шипилло В. П. Автоматизированный вентильный электропривод / В. П. Шипилло/ – Москва: Энергия, 1969. – 400с.
9. Маевский О. А. Энергетические показатели электроэнергии вентильных преобразователей / О. А. Маевский – М.: Энергия, 1968, – 304 с.
10. Горбачев Г. Н. Промышленная электроника / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин; под ред. В. А. Лабунцова.– Москва: Энергоатомиздат, 1988.

11. Міліх В. І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : Підручник / В. І. Міліх, О.О Шавьолкін. — Київ: Каравела, 2015. — 688 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А – Программа исследования сглаживающих фильтров в схемах неуправляемых выпрямителей

Тип схемы НВ	Тип фильтра	U_1	I_1	U_2	I_2	I_d	U'_d	U_d	$U'_{вд}$	$U_{вд}$
		В	А	В	А	мА	В	В	В	В
	Без фильтра									
	Индуктивный									
	Емкостной									
	Г-образный LC									
	Г-образный RC									
	П-образный LC									
	П-образный RC									
	Г-образный с резонансным контуром									

Приложение Б – Программа исследования сглаживающих фильтров в схемах неуправляемых выпрямителей. Расчетные данные

Тип фильтра	$U'_{в\ max}$	$U_{в\ max}$	K'_{Π}	K_{Π}	K_{Φ}	η_{Φ}
	В	В	%	%	%	%
Без фильтра						
Индуктивный						
Емкостной						
Г-образный LC						
Г-образный RC						
П-образный LC						
П-образный RC						
Г-образный с резонансным контуром						

где $U'_{в\ max} = U'_{вд} \cdot \sqrt{2}$ – амплитуда переменной составляющей напряжения на выходе неуправляемого выпрямителя;

$U_{в\max} = U_{вд} \cdot \sqrt{2}$ – амплитуда переменной составляющей напряжения на нагрузке;

$K'_н = \frac{U'_{в\max}}{U'_d}$ – коэффициент пульсации на входе фильтра;

$K_н = \frac{U_{в\max}}{U_d}$ – коэффициент пульсации на выходе фильтра;

$K_\phi = \frac{K'_н}{K_н}$ – коэффициент фильтрации;

$\eta_\phi = \frac{U_d}{U'_d}$ – коэффициент полезного действия (КПД) фильтра. Характеризует потерю напряжения в фильтре и для фильтров большой мощности составляет порядка 0,99, а для фильтров малой мощности – 0,50–0,90.

По полученным данным **построить** следующие **зависимости**:

1. $U_d = f(I_d)$ – внешняя характеристика для всех типов сглаживающих фильтров;
2. $K_н = f(I_d)$ – зависимость коэффициента пульсации от среднего значения тока на нагрузке для всех типов сглаживающих фильтров;
3. $K_\phi = f(I_d)$ – зависимость коэффициента фильтрации от среднего значения тока на нагрузке для всех типов сглаживающих фильтров регулировочная характеристика;

При проведении эксперимента **снять осциллограммы**:

1. Напряжения и тока на выходе неуправляемого выпрямителя в схеме без фильтра и с заданными преподавателем типами сглаживающих фильтров;
2. Напряжения и тока фазы вентильной обмотки трансформатора при подключении неуправляемого выпрямителя без фильтра и с заданными преподавателем типами сглаживающих фильтров;

3. Напряжения и тока фазы сетевой обмотки трансформатора при подключении неуправляемого выпрямителя без фильтра и с заданными преподавателем типами сглаживающих фильтров;
4. Напряжения и тока на нагрузке в схеме без фильтра и с заданными преподавателем типами сглаживающих фильтров;

СОДЕРЖАНИЕ

ВСТУПЛЕНИЕ.....	3
1. Исходные данные для выполнения лабораторной работы	3
2 Задание на выполнение лабораторной работы	4
3. Оформление результатов лабораторной работы.....	4
4. Структура силовой части лабораторного стенда	6
5. Программа проведения эксперимента.....	12
6. Теоретическое обоснование работы схем	14
6.1 Основные положения.....	14
6.2 Однофазные неуправляемые выпрямители.....	14
6.2.1 Однофазный однопульсный нулевой неуправляемый выпрями- тель.....	14
6.2.2 Однофазный двухпульсный мостовой неуправляемый выпрями- тель.....	16
6.3 Трёхфазные неуправляемые выпрямители.....	18
6.3.1 Трёхфазный трёхпульсный нулевой неуправляемый выпрямитель.....	18
6.3.2 Трёхфазный шестипульсный мостовой неуправляемый выпрямитель.....	20
6.4 Сглаживающие фильтры.....	22
6.4.1 Емкостной фильтр.....	24
6.4.2 Резонансный LC фильтр.....	26
6.4.6 Внешняя характеристика неуправляемого выпрямителя с различ- ными типами сглаживающих фильтров.....	27
7. Вопросы для самопроверки	28
Список литературы.....	29
Приложение А. Программа исследования сглаживающих фильтров в схемах неуправляемых выпрямителей.....	30
Приложение Б. Программа исследования сглаживающих фильтров в схемах неуправляемых выпрямителей. Расчетные данные.....	31

ДЛЯ ЗАМЕТОК

[illegible]

Навчальне видання

**Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи
«Дослідження згладжуючих фільтрів »
з дисципліни «Енергетична електроніка»
для студентів електротехнічних спеціальностей,
в тому числі для іноземних студентів**

Російською мовою

Укладачі : ЖЕМЕРОВ Георгій Георгійович
КРИЛОВ Денис Сергійович
ХОЛОД Ольга Ігорівна

Відповідальний за випуск	проф. Жемеров Г.Г.
Роботу рекомендував до друку	проф. Мілих В. І.

В авторській редакції

План 2020, поз. 13

Підп. до друку 17.06.2020

Друк – ризографія.

Ум. друк. арк. 2.0

Зам. № .

Формат 60x84 1/16. Папір офсет. №2.

Гарнітура – Times New Roman.

Тираж 50 прим.

Ціна договірна

Видавничий центр НТУ"ХП", 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017р.
